



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**LINEAARIKIIHDYTTIMEN LÄMPÖ- JA
VÄRÄHTELYSIMULAATIO**

Henri Berg

KONETEKIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Kesäkuu 2020

TIIVISTELMÄ

Lineaarikiihdyttimen lämpö- ja värähtelysimulaatio

Henri Berg

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2020, 34 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Jyri Porter

Tässä työssä kuvataan CERN instituutin toimintaa yleisesti, sekä käsitellään prototyyppivaiheessa olevan kompaktin lineaarikiihdyttimen ominaisuuksia. Työssä tarkastellaan myös lineaarikiihdyttimen moduulista tehtyä kaksiosaista simulaatiota, jossa pyrittiin selvittämään moduulin ominaisvärähtelytaajuuudet ja eri jäähdytysratkaisujen vaikutuksia rakenteen lämpölaajenemiseen. Simulaatio suoritettiin Ansys 2019 R1 ohjelmalla Static Structural, Modal ja Static-State Thermal -ympäristöjä käyttäen. Tutkimuksessa havaittiin lineaarikiihdyttimen moduulin värähtelevän ongelmalliseksi tulkitulla 20-55 Hz alueella. Värähtelytavan perusteella voidaan päätellä, että etenkin kiihdyttimen asemointi- ja säätöjärjestelmiin tulee tehdä muutoksia ominaisvärähtelytaajuuksien muuttamiseksi. Kiihdyttimen jäähdytyskierron jakaminen kahteen tai neljään erilliseen kiertoon todettiin hyödylliseksi lämpölaajenemisen aiheuttamien muodonmuutosten hillitsemiseksi. Tulokset viitoittavat tietä lineaarikiihdyttimen jatkokehitykselle, jotta se saavuttaisi sille asetetut tavoitteet.

Asiasanat: CLIC, lineaarikiihdytin, värähtelysimulaatio, lämpösimulaatio.

ABSTRACT

Thermal and modal simulation of a linear accelerator

Henri Berg

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2020, 34 pp.

Supervisor at the university: Jyri Porter

This thesis covers overall functions of the CERN institute as well as features of the prototype of compact linear collider. This paper also examines a two-part simulation, which aimed to solve the modal vibration frequencies of the linear collider module and the effectiveness of different cooling solutions to the thermal expansion. Simulation was conducted with Ansys 2019 R1 software in Static Structural, Modal and Steady-State Thermal environments. The study showed that the module vibrates in a range of 20-55 Hz, which is deemed problematical. Based on the fashion of the vibration the positioning and tuning system of the accelerator needs further development in order to raise the modal frequencies into a more favourable range. The study also shows that dividing the cooling into two or four separate loops is beneficial for limiting the thermal expansion in the structure. The results help to guide the way of future development of the linear collider in so that it can meet the requirements set for it.

Keywords: CLIC, linear accelerator, thermal simulation, modal simulation.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	6
1.1 CERN tutkimuskeskus	6
1.2 Nykyiset laitteistot	6
2 UUSI KIIHDTINLAITTEISTO.....	8
2.1 CLIC – Kompakti lineaaritörmäytin	8
2.2 Kaksoissäteen toimintaperiaate	8
2.3 Systeemissä oleva energia ja turvajärjestelmä	9
2.4 Aiemmat tutkimukset	11
3 TUTKIMUSMETODI	13
3.1 CLIC-moduulin lämpö- ja värähtelysimulaatiotutkimuksen tavoite.....	13
3.2 Mallin kuvaus.....	13
3.3 Värähtelytutkimuksen parametrit ja toteutus	15
3.4 Lämpötutkimuksen parametrit ja toteutus.....	16
4 TULOKSET	21
4.1 Värähtelysimulaation tulokset.....	21
4.2 Värähtelysimulaation tulosten pohdinta.....	24
4.3 Lämpösimulaation tulokset	26
4.4 Lämpösimulaation tulosten pohdinta	27
4.4.1 Jäähdytysratkaisujen vertailu.....	27
4.4.2 Vedenkierron lisäämisen vaikutus JR1:een	28
4.5 Virheet.....	28
5 YHTEENVETO	30
5.1 Värähtelysimulaatio	30
5.2 Lämpösimulaatio.....	30
LÄHDELUETTELO	32

MERKINNÄT JA LYHENTEET

ALICE	Suuri ionitörmäyskoe (A Large Ion Collider Experiment)
ALICE	Suuri ionitörmäyskoe
ATLAS	Toroidinen LHC laitteisto (A Toroidal LHC Apparatus)
CERN	Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskus (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)
CLIC	Kompakti lineaaritörmäytin (Compact Linear Collider)
CMS	Kompakti myonisolenoidi hiukkasilmaisín (Compact Muon Solenoid)
FEA	Elementtimenetelmä analyysi
LHC	Suuri hadronitörmäytin (Large Hadron Collider)
LHCb	LHC-kaunis -koeasema (LHC-beauty)
Linac	Lineaarikiihdytin (Linear Accelerator)
JR	Jäähdytysratkaisu
SK	Superkiihdytin
SKK	Superkiihdytinketju

1 JOHDANTO

1.1 CERN tutkimuskeskus

CERN tulee Ranskan kielen sanoista ”Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire” (englanniksi European Organization for Nuclear Research) ja tarkoittaa Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskusta. CERN perustettiin vuonna 1952 keskittämään Euroopan hiukkastutkimusosaaminen yhden laitoksen alle. Ensimmäinen CERN laboratorio rakennettiin vuonna 1954 Sveitsin ja Ranskan väliselle rajalle. Se oli yksi ensimmäisiä Euroopan yhteisiä hankkeita. (About CERN 2012). CERN hankkeessa on nykyään 22 Euroopan jäsenmaata ja yli 600 instituuttia ja yliopistoa toimii sen tiloissa tai hyödyntää sen laitteistoja. Vuosittain CERNissä vierailee noin 12 000 tutkijaa 70 eri maasta ja se työllistää suoraan 2500 henkilöä, jotka vastaavat kiihdyttimien suunnittelusta, rakentamisesta ja sujuvasta toiminnasta. Tämä henkilökunta auttaa myös valmistelemaan, suorittamaan, analysoimaan ja tulkitsemaan kertynyttä dataa. (Member states 2012). Perustamishetkellä fysiikassa pyrittiin ymmärtämään atomin ytimen olemusta, josta juontuu CERN -nimen ”Nuclear” sana. Tiedon kasvaessa tutkimus on siirtynyt atomitasoa syvemmälle, aineen perimmäisiin rakennusosiin ja niiden välisiin voimiin. (About CERN 2012).

1.2 Nykyiset laitteistot

CERNissä on maailman suurimmat ja monimutkaisimmat tieteelliset instrumentit, joilla fyysikot ja insinöörit pyrkivät selvittämään maailmankaikkeuden syvintä rakennetta. Nämä instrumentit eli hiukkaskiihdyttimet kiihdyttävät partikkeleita lähes valonnopeuteen ja törmäyttävät ne toisiinsa tai staattiseen objektiin detektorin kohdalla. Törmäyksen aikana monimutkainen detektorijärjestelmä havaitsee ja tallentaa syntyneet partikkelit ja niiden ominaisuudet. Syntyviä uusien partikkelien käyttäytymisestä voidaan vetää johtopäätöksiä alkuräjähdyksestä seuranneista hetkistä (Accelerator complex 2012) ja luonnonlakien perimmäisestä olemuksesta (About CERN 2012).

CERNin nykyinen kiihdytinkompleksi koostuu laitteiden sarjasta, jossa partikkelikimppu, useimmiten protoneja, kiihdytetään aina suurempiin energioihin. Protonilähde on yksinkertaisesti pullo vetyä. Vedyn atomeista irrotetaan elektroni sähkökentän avulla, jolloin jäljelle jää protoni, joka johdetaan eteenpäin. Linac 2 (Linear Accelerator 2) on kiihdyttimistä ensimmäinen, joka saattaa protonit 50 MeV energiaan ja noin kolmasosaan valonnopeudesta. Useiden kiihdytysvaiheiden jälkeen lähes valonnopeutta kulkevat protonit johdetaan viimeisen kiihdytinlaitteiston, LHC:n (Large Hadron Collider) kahteen sädeputkeen, joista toinen putki kulkee myötäpäivään ja toinen vastapäivään. Kummankin renkaan täyttäminen partikkelikimpuilla kestää 4min ja 20sec ja 6.5 TeV maksimienergian saavuttamiseen kuluu 20min. Normaalioloissa säteet kiertävät kehää useiden tuntien ajan. Näiden tuntien aikana sädekimput saatetaan törmäyskurssille neljän detektorin – ALICE, ATLAS, CMS, LHCb – kohdalla, jolloin säteiden yhteenlaskettu energia on 13 TeV. (Accelerator complex 2012).

2 UUSI KIIHDTINLAITTEISTO

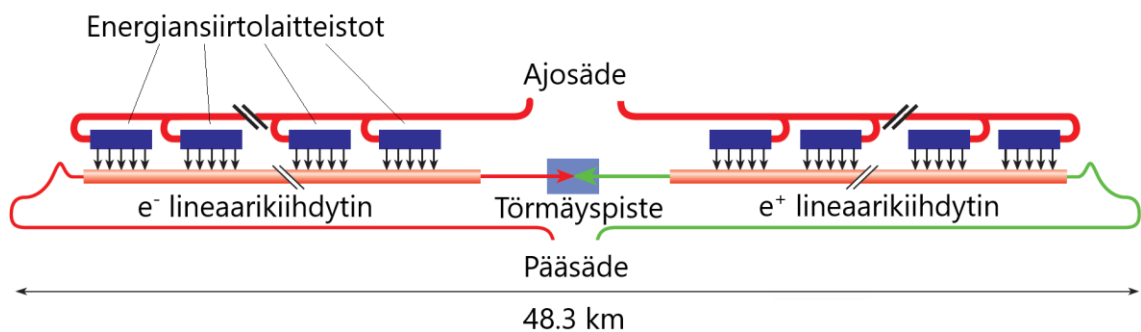
2.1 CLIC – Kompakti lineaaritörmäytin

Lebrun et al. (2012) mukaan CLIC-tutkimuksen tavoitteena on kehittää usean teraelektronivoltin lineaarinen elektroni – positroni törmäytin. Tutkimus keskittyy 3 TeV mittaluokan suunnitelmaan ja sen tekniikan toteuttamiskelpoisuuden todistamiseen, mutta sisältää myös alemmien energialuokkien välietappien suunnitelmia. Sekä nykyinen LHC että suunnitelmissa oleva CLIC toimisivat siis suurin piirtein samoissa energialuokissa. (The Compact Linear Collider 2012). Monet laboratoriot harkitsevat 0,5 – 1 TeV massakeskiöenergioiden elektroni – positroni törmäyttimiä. Näillä laitteilla voitaisiin mahdollisesti tuottaa kevyempiä supersymmetrisiä partikkeleita, mutta koko supersymmetristä spektriä niillä ei voi tuottaa, eikä tutkia voimakkaampia uusia vuorovaikutuksia. CLIC laitteiston elektroni – positroni ominaisuus ja muita lineaarikiihdyttimiä suurempi massakeskiöenergia riittäisi paremmin täydentämään LHC:n tuloksia ja antamaan erilaista perspektiiviä suurenergiseen hiukkastutkimukseen. (Ellis 2000; The Compact Linear Collider 2012). Törmäävien hiukkaskimppujen energian lisäksi toinen tärkeä hiukkaskiihdyttimen atribuutti on luminositeetti. Luminositeetin yksiköksi on vakiintunut $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, ja se kuvastaa kiihdyttimen kykyä tuottaa tapahtumia yhden neliösenttimetrin alalle yhden sekunnin aikana. Luminositeettiin vaikuttaa oleellisesti törmäävien kimppujen partikkelitiheys ja lukumäärä. (Herr ja Muratori 2006).

2.2 Kaksoissäteen toimintaperiaate

Kuvassa 1 näkyy sommittelu CLIC kiihdytinkompleksista. CLIC käyttää partikkeleiden kiihdyttämiseen uutta kaksoissädetekniikkaa, jossa yhdistyy rinnakkain kulkeva ajo- ja pääsäde. Ajosäteessä on alhainen energia mutta korkea virta ja pääsäteessä taas korkea energia ja alhainen virta. Kun ajosädettä jarrutetaan erityisissä energiansiirtolaitteissa, sen sisältämä kineettinen energia saadaan kuljetettua pääsäteelle, jolloin pääsäteen kiihtyvyysgradientiksi saadaan jopa 100MV/m. Kaksoissädetekniikkaa käyttämällä poistetaan säteen kiihdyttämiseen käytettävien klystron radioaaltolähteiden sijoittelun tarve koko kiihdyttimen pituudelle. Jotta sädekimppujen massakeskiöenergiaksi saadaan

haluttu 3 TeV, vaaditaan kiihdyttimeltä pituutta 50 km. (Dannheim et al. 2019, s.3). Pääsäteen kiihdytin koostuu kolmesta erilaisesta moduulityypistä. Yleisin moduuli on noin 2,3 metriä pitkä ja sisältää kahdeksan kiihdytinrakennetta. Kaksi muuta moduulityyppiä sisältää kuusi tai neljä kiihdytinrakennetta. Moduulit koostaan maanpinnalla ja lasketaan tunneliin, jossa ne kiinnitetään toisiinsa muodostamaan yksi yhtenäinen kiihdytinrakennelma. (Aicheler et al. 2018).



Kuva 1. Kaksoissäteen sommittelu (mukaillen Aicheler et al. 2012).

2.3 Systeemissä oleva energia ja turvajärjestelmä

Aicheler et al. (2012) mukaan ympyränmallisia kiihdyttimien törmäytystiheys on yleensä kymmenien kilohertsien luokkaa. CLIC laitteiston verrattain alhainen törmäytystiheys 50 Hz sekä leptonitörmäyksissä muodostuvasta alhaisesta taustasäteilystä johtuen detektori, sekä sen välitön ympäristö altistuu paljon pienemmälle säteilylle kuin esimerkiksi LHC:n detektori (Dannheim et al. 2019). CLIC laitteistossa on kuitenkin varautuneena todella paljon energiaa, enimmillään yhteensä 1920 kJ joista 296 kJ on pääsäteissä ja 1624 kJ ajosäteissä. Suunniteltujen ajosäteiden teho on lähes kaksi magnitudia suurempi kuin minkään olemassa olevan elektroneita kiihdyttävän lineaarikiihdyttimen. Näin suuret energiat voivat helposti aiheuttaa vakavaa vahinkoa esimerkiksi lämpökeskittymien, shokkiaaltojen tai rakenteiden sulamisen muodossa, vaikka vain osa energiasta pääsisi karkaamaan. Energian suuruutta kuvaa se, että yksi ajosäde kykenee sulattamaan kupariin 10 mm halkaisijan suuruisen reiän kahden metrin syvyyteen. Turvajärjestelmien huolellinen suunnittelu ja toimivuus on siis erityisen tärkeää. (Assmann et al. 2000).

Assmann et al. (2000) jakaa turvajärjestelmän kolmeen osaan: passiiviseen, aktiiviseen ja ennaltaehkäisevään järjestelmään. Esimerkki passiivisen järjestelmän toiminnasta on säteenhallinnassa käytettävät magneetit, joiden riittävän suuri magneettikehän laminointi pidentää magneettikentän häviämiseen kuluvaan aikaan virtakatkosten aikana ja näin pitää säteen vakaana kauemmin. Myös aktiivisen säätöjärjestelmän riittävä mekaaninen inertia vaimentaa säätömoottorien hetkellisten ylikäyttöjen vaikutuksia laitteen asemoinnissa. (Assmann et al. 2000).

Aktiivinen suojajärjestelmä tarkoittaa säteiden ohjaamista hukkasäiliöön, kun säteenhallinnan parametrit ylittävät annetut raja-arvot. Pääsäteen lyhyen pulssiajan (102 ns) takia säteiden osittaista poistamista ei todennäköisesti voi toteuttaa, vaan koko säde on ohjattava poistettavaksi. Aktiivisen suojajärjestelmän paras toteutustapa riippuu lopullisen laitteiston osakokonaisuuksista. (Assmann et al. 2000). Wilson (2004) nostaa esille yhden Syrathevin (2003) käsittelemistä energiankatkaisumetodeista. Tässä menetelmässä ajosäteeltä pääsäteelle energian siirtävän laitteen toimintaa häiritään. Laitteen sisäpinnalla oleviin uriin työnnetään ohuet piikarbidilevyt, jolloin laite virittyy eri taajuudelle ajosäteen kanssa, eikä siis enää reagoi säteeseen vaan päästää sen kulkemaan lävitseen esteettä. (Wilson 2004).

Ennaltaehkäisevä järjestelmä kykenee muodostamaan pulssien välissä ratkaisun siitä, onko turvallista muodostaa seuraava pulssi. Ratkaisua varten täytyy kerätä ja analysoida kaikkien kriittisten osien tuottama data ja verrata sitä kunkin työhetken turvallisiksi määriteltyihin rajoihin. Ennaltaehkäisevän järjestelmän toinen osa sisältää sen, että operaattoreiden tai automaattisten järjestelmien antamia vaarallisiksi arvioitujen ohjauskäskyjen ei sallita päätyä kiihdyttimelle asti. Kun turvajärjestelmä arvelee seuraavan pulssin ylittävän turvalliset raja-arvot, se pudottaa koko laitekompleksin automaattisesti alemmalle turvallisiksi katsomalleen toiminta-arvoille. Tällaisen päätöksen tuottama seisokkiaika viivästyttää tutkimusten suorittamista noin tunnin. (Assmann et al. 2000).

2.4 Aiemmat tutkimukset

CLIC laitteiston eri osa-alueista on tehty lukuisia tutkimuksia aina säteenhallinnasta ja detektoritekniikasta tunnelin rakentamiseen asti. Kiihdytinlaitteiston lämpenemisen tutkimuksessa toistuva aihe on ollut rakenteen sisäpinoilla olevien lämpöshokkien syntyminen ja vaikutukset. Värähtelytutkimukset taas käsittelevät usein säteenhallinnassa käytettyjen magneettien värähtelyominaisuuksia ja seismisen taustakohinan merkitystä. Aicheler (2010) tutkii väitöskirjassaan “Surface phenomena associated with thermal cycling of copper and their impact on the service life of particle accelerator structures” kiihdyttimen pulssimaisen toiminnan aiheuttaa kuparisten pintojen karkenemista ja karheutumista. Väitöskirjassa tutkitaan erillä lailla lämpökäsiteltyjen kuparien käyttäytymistä erilaisissa syklisissä kuormituskokeissa. Aichelerin (2010) havaintojen mukaan korkean tekstuurin ja pienen raekoon omaava kupari tai voimakkaan [1 0 0] tekstuurin kuparifilmi ovat lupaavimmat materiaalit CLIC pääsäteen kiihdyttimen materiaaliksi. Aicheler arvioi tulosten perusteella, että kuparisen rakenteen väsymiskestävyys ei muodostu ongelmaksi, mutta pinnan karhenevuutta alkaa ilmentyä ennen laitteiston suunniteltua käytöstä poistoa. Siihen, muodostuuko lisääntynyt pinnankarheus rajoittavaksi tekijäksi laitteiston kannalta, ei väitöskirjassa oteta kantaa.

Artoos et al. (2011) käsittelee tutkimuksessaan “Modal Analysis and Measurement of Water Cooling induced Vibrations on a CLIC Main Beam Quadrupole Prototype” vesijäähdytyksen aiheuttamia värähtelyitä pääsäteen hallinnassa käytettyihin kvadrupolimagneetteihin. Tutkimuksessa mainitaan, että magneettien suurin sallittu poikkeama yli hertsin taajuuksilla on 1,5 nm. Tämä on paljon tiukempi vaatimus, kuin Aicheler et al. (2018) mainitsema kiihdytinrakenteen paikoituksessa käytetty 14 µm toleranssi. Magneettien paikoitus on erittäin tarkkaa, jotta saavutetaan korkean luminositeetin vaatimat vakaat 200 T/m magneettikentät. (Aicheler et al. 2012, s. 51; Artoos et al. 2011 s. 541). Artoos et al. (2011) mainitsee tutkimuksessaan, että saavuttaakseen nanometriluokan tarkkuuden tarvitaan säteen sijainnin takaisinsyöttöjärjestelmä ja korjausdipolimagneetteja, sekä aktiivinen värähtelyn stabilisointijärjestelmä jokaisen kvadrupolimagneetin alle. Tutkimuksen lopputulema on, että vesijäähdytys voimistaa seismisestä taustavärähtelystä aiheutuvia värähtelyitä, kun kvadrupolimagneetin rakenteellinen jäykkyys ei ole suurin mahdollinen. Kun rakenteen

kokonaisjäykkyys korotettiin maksimiin, vesijäähdytyksen vaikutuksia oli vaikea erottaa taustakohinasta. (Artoos et al. 2011).

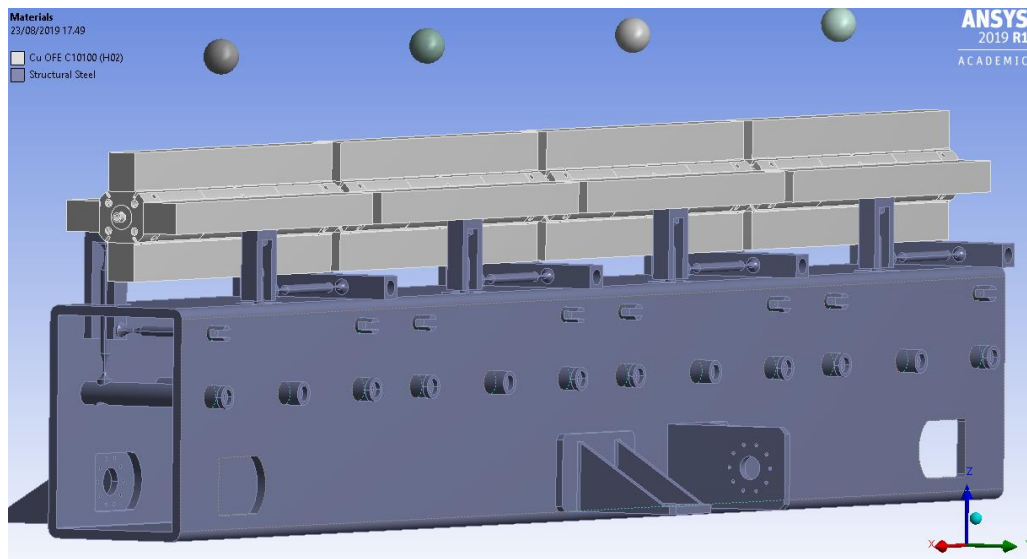
3 TUTKIMUSMETODI

3.1 CLIC-moduulin lämpö- ja värähtelysimulaatiotutkimuksen tavoite

Tämän tutkimuksen ensimmäisessä osassa keskityttiin selvittämään CLIC moduulin ominaisvärähtelytaajuudet ja värähtelyn tyyli käyttäen Ansys 2019 R1 -ohjelman Static Structural ja Modal ympäristöjä. Tutkimuksen toisessa osassa pyrittiin selvittämään erilaisten jäähdytyspohjapiirrosten vaikutukset yksittäisen superkiihdyttimen lämpölaajenemiseen, sekä vesikierron tehostamisen vaikutuksia rakenteen lämpötiloihin yhdessä jäähdytysratkaisussa. Tutkimuksessa hyödynnettiin valmista CATIA suunnitteluohjelmalla luotua 3D-mallia, joka siirrettiin Ansys ympäristöön simulointia ja analysointia varten.

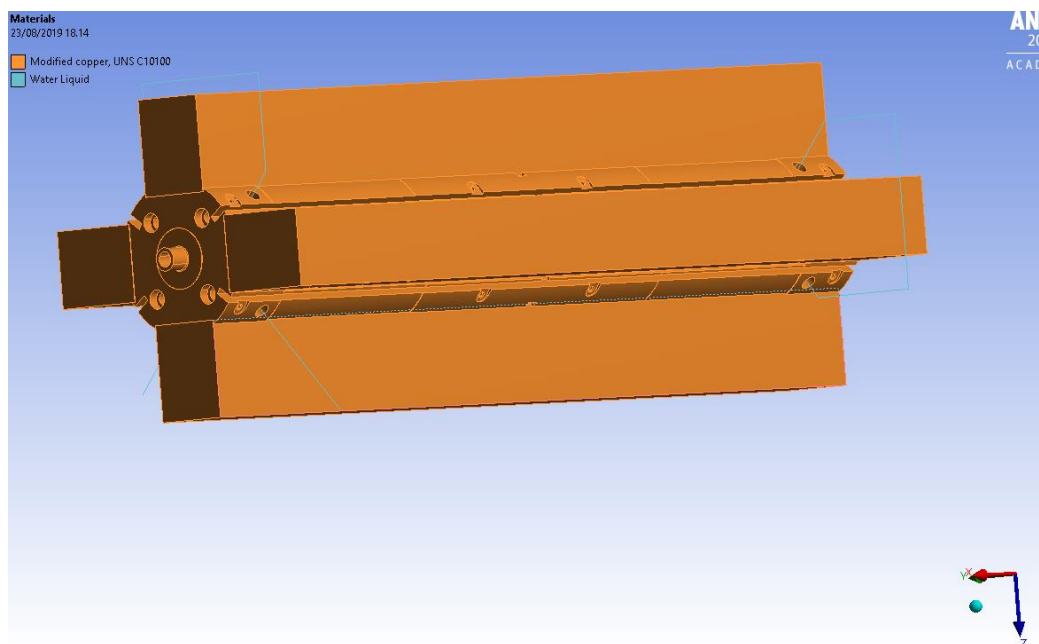
3.2 Mallin kuvaus

Lineaarikiihdyttimen alkuperäiseen 3D-malliin oli piirretty kaikki toimintaan vaikuttavat rakenteet ja osakokonaisuudet. Laskennan keventämiseksi mallia yksinkertaistettiin poistamalla pienempiä piirteitä ja osia, joiden vaikutukset rakenteen kokonaisjäykkyyden tai lämmönjohtumisen kannalta arvioitiin häviävän pieniksi. Tällaisia osia olivat muun muassa pulttien kannat, pienet reiät, mittausinstrumenttien kannakkeet ja hienosäätöön liittyvät osat. Taipuma- ja värähtelysimulaatiossa käytettyyn malliin kuului neljästä superkiihdyttimestä (myöhemmin SK) muodostettu superkiihdytinketju (myöhemmin SKK) kuvassa 2 vaalean harmaalla väritetty osa, joka vastaa säteen kiihdytyksestä ja ohjauksesta, superkiihdyttimien tukirakenteet, asemointisysteemi, runkopalkki johon superkiihdytin on kiinnitetty sekä runkopalkin kannattimet (esitetty kuvassa 2 harmaansinisellä). Palkin kiinnitys maahan simuloitiin rajoittamalla runkopalkin kannakkeiden tiettyjen pintojen vapausasteita. Ominaisvärähtelytaajuuteen voimakkaasti vaikuttavat rakenteet, kuten radioaaltojen ohjaimet ja tyhjiöpumput ovat yksinkertaistettu laskelmiin ”Remote Mass”, eli etämassa ominaisuudella, jonka avulla voidaan määritellä pistemäisen massan suuruus, sijainti sekä kiinnityspiste. Palloina visualisoidut etämassat sijoitettiin neljään kohtaan säteen keskilinjan yläpuolelle.



Kuva 2. Värähtelysimulaatiossa käytetty 3D malli.

Lämpösimulaation malli (Kuva 3) oli värähtelysimulaation mallia paljon yksinkertaisempi; runkopalkin ja asemoimisjärjestelmän poistamisen jälkeen malliin jätettiin ainoastaan yksi superkiihdytin ja lisättiin jäähdytysvesi viivaelementteinä neljän jäähdytyskanavan sisään. Asemointijärjestelmän aiheuttama rajoitus liikkuvuuteen ja taipumiseen simuloitiin poistamalla vapausparametreja tietyiltä pinnoilta.

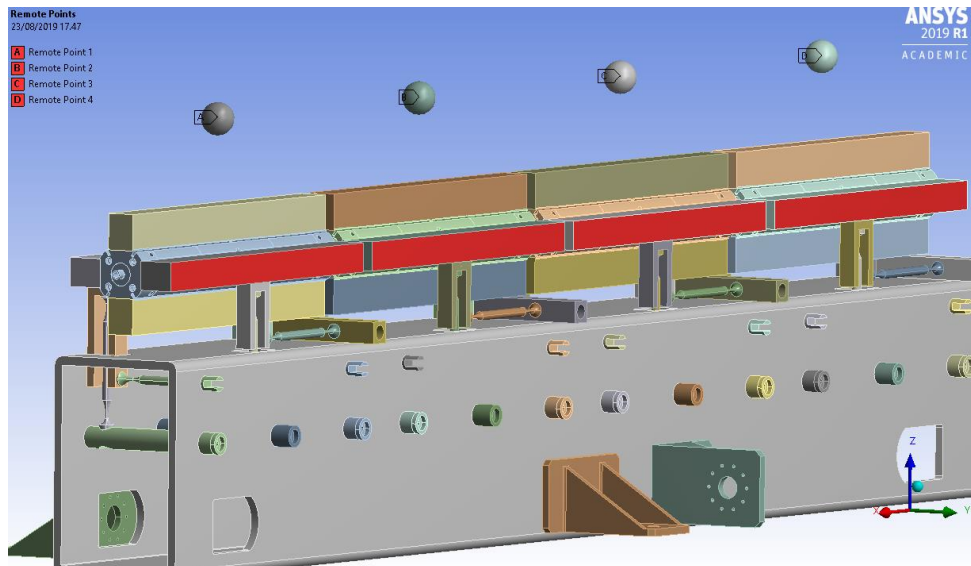


Kuva 3. Lämpösimulaatiossa käytetty 3D malli.

3.3 Värähtelytutkimuksen parametrit ja toteutus

Ansys määritettiin tuottamaan rakennelman kuusi ensimmäistä resonanssimoodia. Värähtelysimulaation eri osien kiinnittyminen keskenään piti tarkistaa Ansysin automaattisen kontaktien luomisen jälkeen. Ohjelmassa määritellään tietty pintojen keskinäisen etäisyyden raja-arvo, jonka alittavat pinnat liittyvät toisiinsa. Ohjelma luo automaattisesti tämän arvon mallin mittasuhteiden perusteella ja tutkimuksessa olleen mallin raja-arvo oli useita millimetrejä. Tämä aiheutti liiallisten kontaktien muodostumisen pintojen välille, joiden kuului olla keskenään vapaasti liikkuvia. Alle millimetrin raja-arvolla ylimääräisiä kontakteja ei syntynyt. Jotkin pinnat, etenkin superkiihdyttimien asemointijärjestelmässä, jäivät taas kokonaan ilman keskinäisiä kontakteja, vaikka viereinen kappale oli asetettu aivan kiinni niihin. Näiden kappaleiden välille tuli luoda manuaalinen kontaktipinta ja määritellä niiden väliset vapausrajoitteet.

Runkopalkille, kannakkeille ja SK:n asemointi- ja tukijärjestelmille annettiin Ansys materiaalikirjastosta rakenneteräs S235 ominaisuudet ja superkiihdyttimelle CATIAN materiaalikirjastosta happivapaan kuparin C10100 ominaisuudet. Metalliin kohdistettu elektromagneettinen säteily pystyy irrottamaan kaasuja sen rakenteesta. Irronneet kaasut heikentävät tyhjiössä kulkevan säteen laatua ja aiheuttavat merkittävää taustasäteilyä detektoreihin (Gröbner 1993, s. 1; Aicheler 2018, s. 12). Happivapaan kuparin OFE C10100 käyttö takaa minimaalisen epäpuhtauksien esiintymisen radioaaltojen ja säteen tyhjiökäytävissä. (Gröbner et al. 1993). Maan standardipainovoiman arvo saatiin Ansysin kirjastosta. Rakenteen yläpuolella olevat palloilla kuvatut etämassat ovat kiinnitetty virtuaalisesti SKK:n molemmiin puolin punaisella merkattuihin pintoihin kuvaan 4. Etämassoiksi yksinkertaistettujen komponenttien kokonaismassaksi arvioitiin 150 kg ja massakeskiön sijainniksi 200 mm säteen keskilinjan yllä. Simulaatiossa käytetyt arvot on listattu taulukkoon 1.



Kuva 4. Etämassojen sijainti sekä kiinnityskohta.

Taulukko 1. Värähtelysimulaatiossa käytetyt arvot.

Ominaisuus	Suure	Arvo
Palkin tiheys	kg/m^3	7850
Superkiihdyttimen tiheys	kg/m^3	8940
Maan kiihtyvyys	m/s^2	9,8066
Etämassan suuruus	kg	150

3.4 Lämpötutkimuksen parametrit ja toteutus

Jäähdytyksessä käytettävä vesi mallinnettiin piirtämällä viivarakenteita jäähdytyskanavien sisälle. Tämän jälkeen viivarakenteille annettiin halkaisija ja yksittäiset viivat yhdistettiin yhdeksi elementiksi. Ansys laskentaohjelma määriteltiin tulkitsemaan tätä elementtiä nesteinä, jolle annettiin virtaussuunta sekä veden ominaisuudet, kuten tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus. Arvot saatiin Engineering ToolBox -verkkojulkaisun vesitaulukoista (2004 & 2018), sekä Anton Paarin

(2019) tekemästä taulukosta joka pohjautuu The International Association for the Properties of Water and Steam (2008) tekemiin laskelmiin.

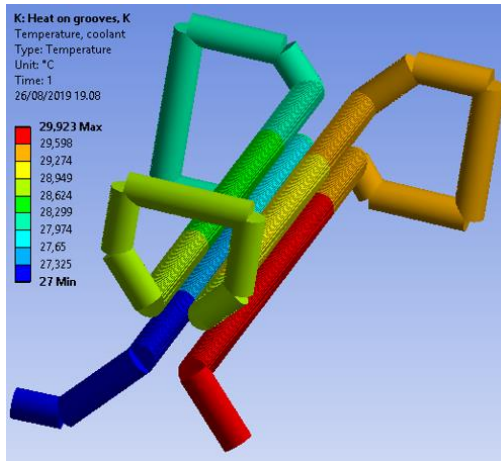
Rakenteeseen tuotiin lämpö mallin pituussuunnassa kulkevien urien kautta, joilla pyritään simuloimaan radioaaltojen tuoma lämpökuorma ajosäteen ollessa päällä, mutta pääsäteen ollessa kiinni. Tässä skenaariossa ajosäde tuottaa laitteeseen energiaa jota pääsäde ei ole kuljettamassa pois, aiheuttaen suuremman lämpökuormituksen kuin molempien säteiden ollessa päällä (Aicheler et al. 2012, s.397).

Superkiihdyttimen pinnalta lähtevän lämpösäteilyn kertoimeksi määritettiin 0,05 (Engineering ToolBox 2003). Maan standardipainovoima, kuparin lämmönjohtavuus ja kuparin ja ilman välisen vapaan konvektion arvo saatiin Ansysin ja CATIAn kirjastosta. Jäähdytysveden alkulämpötila, ympäristön lämpötila ja systeemiin tuodun lämmön määrä perustui Moilasen et al. (2017) aiempien tutkimusten parametreihin ja kollegoiden kanssa käytyihin keskusteluihin. Lämpösimulaatiossa käytetyt arvot on listattu taulukkoon 3.

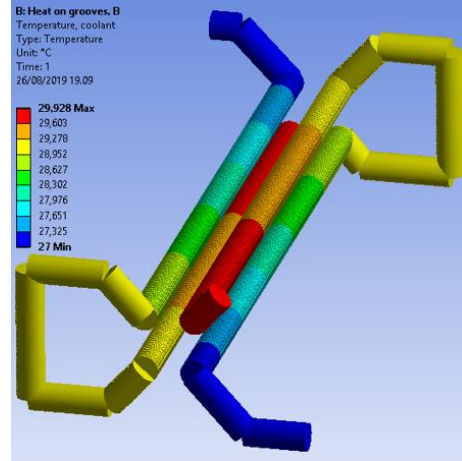
Taulukko 2. Lämpösimulaatiossa käytetyt arvot.

Ominaisuus	Suure	Arvo
Veden tiheys	kg/m ³	996,5
Veden ominaislämpökapasiteetti	J/kg*K	4181.6
Veden lämmönjohtavuus	W/m*K	0,6145
Kuparin lämmönjohtavuus	W/m*K	394
Kupari – ilma -rajapinnan lämpösäteilyn kerroin	-	0,05
Kupari – ilma -rajapinnan vapaa konvektio	W/m ² *°C	5
Systeemiin tuotu lämpö	W	820
Maan vetovoima	m/s ²	9,8066
Veden alkulämpötila	°C	27
Ympäristön lämpötila	°C	28

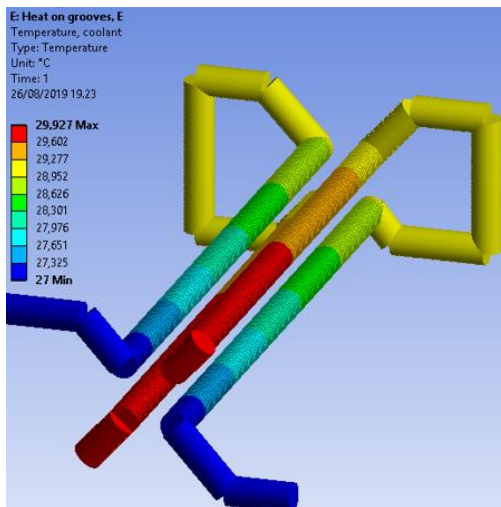
Superkiihdyttimen alapinnalla olevien asemointijärjestelmän kiinnitysreikien vapausasteita rajoitettiin ja systeemille asetettiin gravitaation suuruus ja suunta, jotta lämpölaajenemisen aiheuttama muodonmuutos olisi realistinen. Neljä eri jäähdytysratkaisua testattiin yllä kuvatuilla parametreilla. Jäähdytysratkaisu 1 (myöh. JR1), kuvassa 8, oli yksi vesikierto, jossa oli yksi sisään- ja yksi ulostulo, joten sama vesi kiersi peräjäälkeen jokaisessa neljässä jäähdytyskanavassa. Jäähdytysratkaisu 2 (myöh. JR2), kuvassa 9, oli kaksi vesikiertoa. Superkiihdyttimen molemmissa päissä oli veden sisään- ja ulostulo ja niiden järjestys asetettu toistensa peilikuviksi. Jäähdytysratkaisu 3 (myöh. JR3), kuvassa 10, oli myös kaksikiertoinen, mutta vesi tuli järjestelmään ja poistui sieltä superkiihdyttimen samalta puolelta. Jäähdytysratkaisu 4 (myöh. JR4), kuvassa 11, oli jokainen jäähdytyskanava erotettu omaksi kierrokseen, jolloin vesikiertoja oli yhteensä neljä. Tässä ratkaisussa kaikki raikkaan veden tulot olivat yhdellä puolella ja lämpimän veden poistot toisella puolella. Jokaisessa jäähdytysratkaisussa kanavissa virtaavan veden yhteenlaskettu massavirta oli sama, joten kaksiporttisessa järjestelmässä ei virrannut vain puolta neliporttisen järjestelmän vesimäärästä.



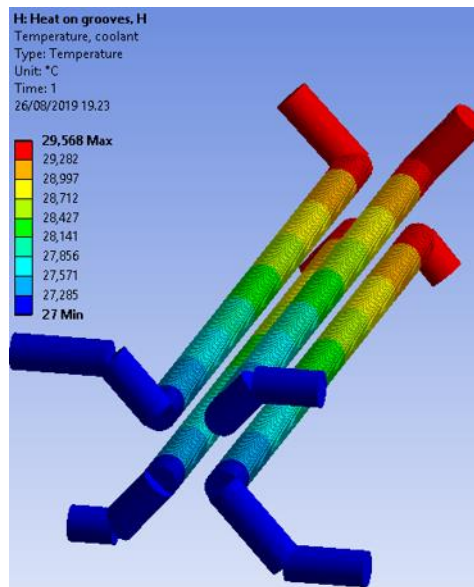
Kuva 8. Jäähdytysratkaisu 1.



Kuva 9. Jäähdytysratkaisu 2.



Kuva 10. Jäähdytysratkaisu 3.



Kuva 11. Jäähdytysratkaisu 4.

Jäähdytysratkaisu 1:lle tehtiin lisätutkimus, jossa selvitettiin virtauman kasvattamisen vaikutus superkiihdyttimen lämpötilaan. Simulaatiossa veden virtausta kasvatettiin yhden kilon inkrementillä yhdestä kilosta minuutissa seitsemään kiloon minuutissa.

4 TULOKSET

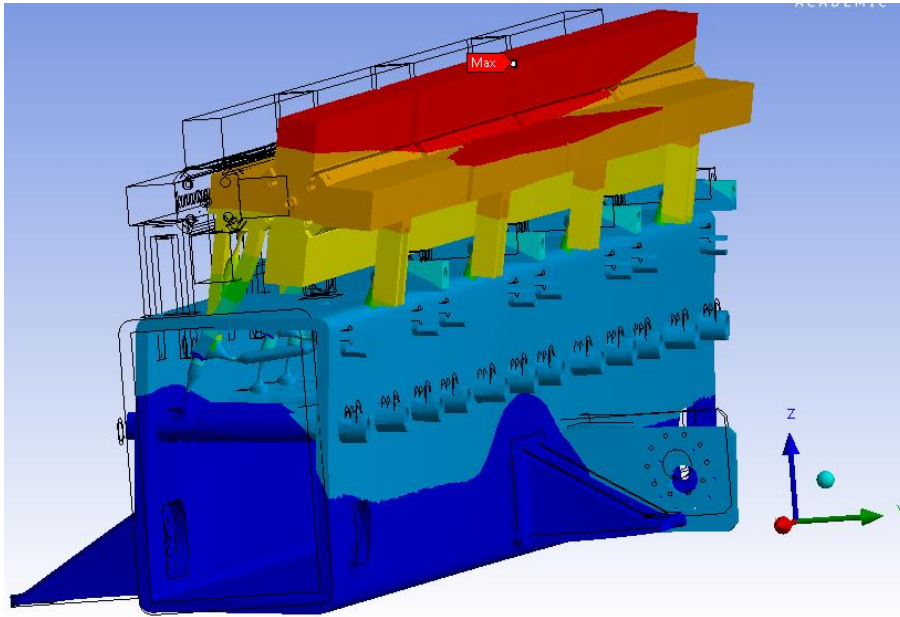
4.1 Värähtelysimulaation tulokset

Värähtelymoodien taajuudet on esitetty taulukossa 2 ja kolmen ensimmäisen moodin käyttäytyminen kuvissa 5-7. Tulosten visuaalisen tarkastelun perusteella rakennelma jakaantuu kahteen selvään osaan, joista ensimmäinen on runkopalkki kannakkeineen (kuvassa 5 sinisen eri sävyillä) ja toinen osa on superkiihdytin tukijärjestelmineen (kuvassa 5 keltaisella, oranssilla ja punaisella). Runkopalkki pysyy lähes paikoillaan verrattuna superkiihdyttimen vaihtelevaan oskillointiin. Tämä karkea jako kahteen eri lailla käyttäytyvään rakenteeseen toistuu kaikilla resonanssimooodeilla. Ensimmäisessä moodissa (Kuva 5) SKK huojuu sivusuunnassa Y-akselin suuntaisesti ja toisessa moodissa (Kuva 6) SKK pyrkii kiertymään suorana koko rakennelman Z-akselin ympäri. Muissa värähtelymooodeissa yksittäiset superkiihdyttimet kiertyvät oman Z-akselinsa ympäri eri vaiheissa, luoden käärmemäisen muodon SKK:lle kolmannen moodin tapaan (Kuva 7). Moodien värähtelytaajuudet olivat 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 30 Hz 40 Hz ja 55 Hz, kuten kuvattu taulukossa 2.

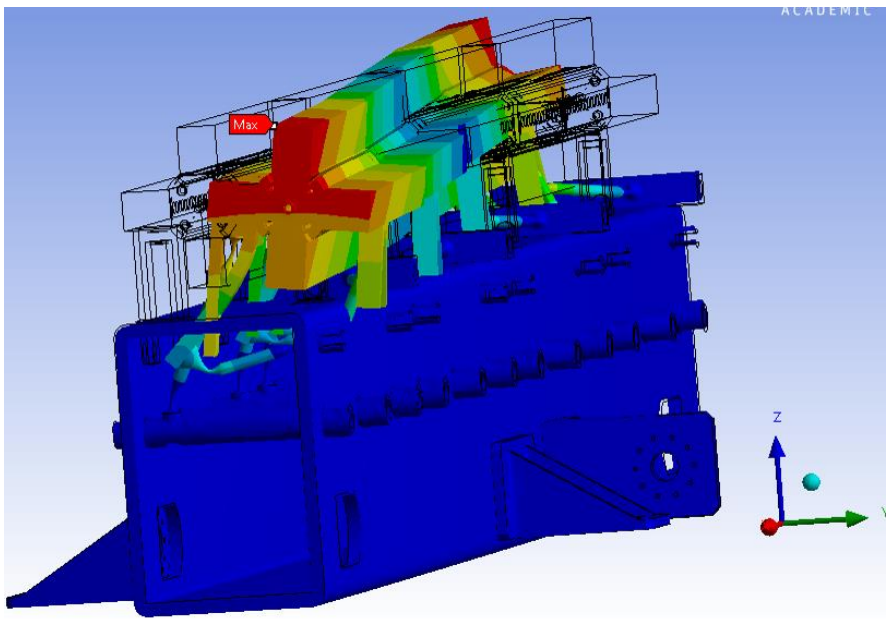
Taulukko 3. Värähtelymoodien taajuudet.

Moodi	Värähtelytaajuus [Hz]
1	20,0
2	24,7
3	29,5
4	29,9
5	40,0
6	55,0

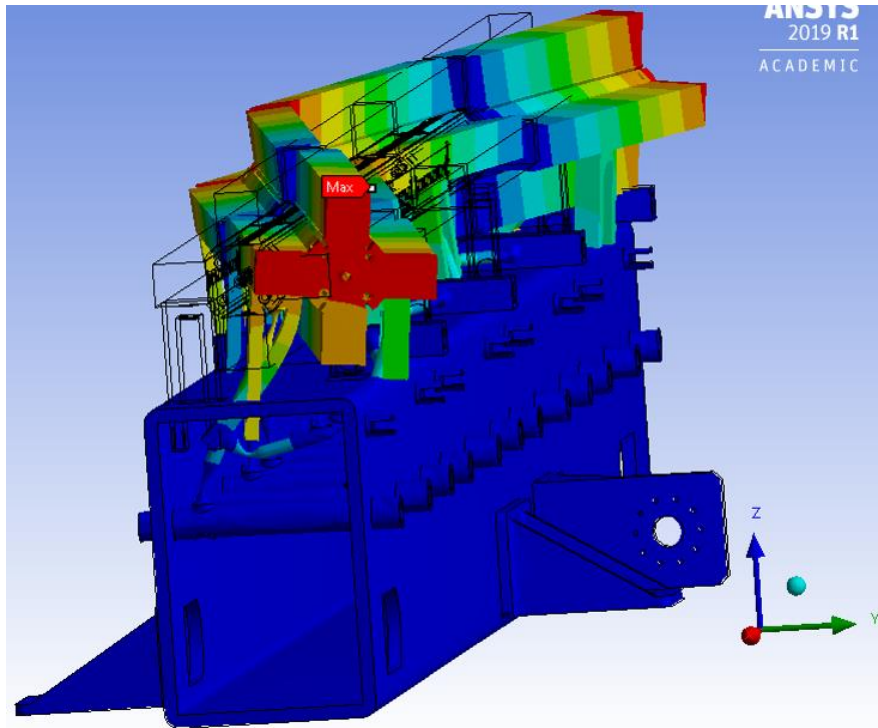
Kuvissa 5, 6 ja 7 rautalankamalli kuvaa rakennelman lepoasennon. Sininen alue on vähiten poikennut lepotilasta ja punainen alue eniten. Poikkeaman magnitudia on kasvatettu silmämääräisen tarkastelun helpottamiseksi.



Kuva 5. Ensimmäinen moodi.



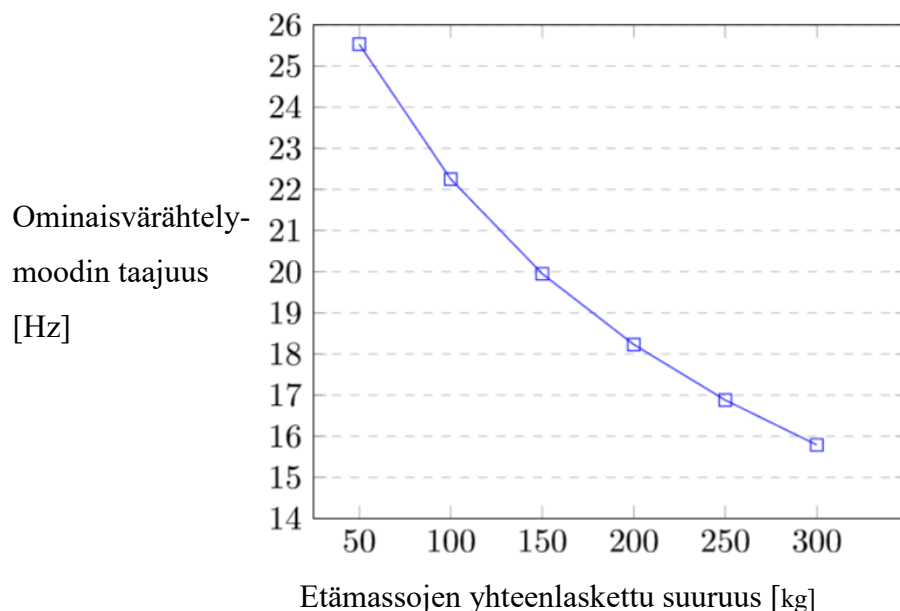
Kuva 6. Toinen moodi.



Kuva 7. Kolmas moodi.

Etämassojen vaikutuksen määrittäminen koko rakenteen ominaisvärähtelytaajuuksiin oli keskeistä, sillä tyhjiöpumppujen ja radioaalto-ohjaimien lopullista mallia ja sijaintia on helpompi muuttaa, kuin muiden rakenteiden. Siksi systeemin ensimmäisen värähtelymoodin taajuus selvitettiin kuudella eri etämassojen suuruudella, kuten kuvaajasta 1 näkyy. Oletusarvon 150 kg lisäksi laskenta suoritettiin 50 kg, 100 kg, 200 kg, 250 kg ja 300 kg massoilla. Etämassan kasvaessa ensimmäisen värähtelymoodin taajuus aleni arvoihin 26 Hz, 22 Hz, 20 Hz, 18 Hz, 17 Hz ja 16 Hz.

Kuvaaja 1. Etämassan vaikutus ensimmäisen värähtelymoodin taajuuteen.



4.2 Värähtelysimulaation tulosten pohdinta

Koko rakenteen ominaisvärähtelytaajuuudet ovat melko alhaisia. Alhaisesta ominaisvärähtelytaajuudesta johtuen laitteessa saattaa esiintyä lukuisia ikäviä värähtelymoodien monikertoja, joten nykyisen ominaistaajuusalueen nostaminen olisi kannattavaa. Toisen värähtelymoodin taajuus 24,7 Hz on erityisen ongelmallinen, sillä sen monikerta on lähellä Euroopassa käytettävän sähköverkon taajuutta 50 Hz (Alanen & Hätönen, 2006). Runkopalkin vakaasta ja superkiihdytinketjun epävakaasta käyttäytymisestä voidaan päätellä, runkopalkki ei kaipaakaan muutoksia vaan SKK:n tuennan

lisääminen tai jäykistäminen nostaisi huomattavasti koko rakennelman ominaisvärähtelytaajuutta. Kuvaajasta 1 nähdään, että superkiihdytinketjuun kiinnitetyillä laitteiston yläpuolisilla komponenteilla (eli etämassoilla) on suuri merkitys ensimmäisen värähtelymoodin taajuuteen. Mitä suurempi massa rakenteen yllä oli, sitä alemmas ominaisvärähtelytaajuus meni. Näin ollen kaiken superkiihdytin rakenteen yläpuolelle sijoitettavien laitteiden keventämistä tulisi priorisoida ominaisvärähtelytaajuuden nostamiseksi. Näiden laitteistojen tai koko SKK:n keventäminen tai laskeminen lähemmäs tukipistettä todennäköisesti vakavoittaisi rakennetta

4.3 Lämpösimulaation tulokset

Simulaatiossa kaikkien jäähdytysratkaisujen veden ulostulolämpötila oli lähes identtinen; JR1 29,92 °C, JR2 29,93 °C, JR3 29,93 °C, JR4 29,57°C. Myös rakenteen maksimi-, minimi- ja keskiarvolämpötilat olivat hyvin samankaltaisia. Rakenteessa olevien kylmien ja kuumien alueiden koko ja sijainti sen sijaan vaihtelivat kussakin jäähdytysratkaisussa. Rakenteeseen aiheutunut muodonmuutos on kuvattu taulukossa 4, jossa X-akseli on rakenteen pituussuuntaan, Y-akseli sivusuuntaan ja Z-akseli pystysuuntaan.

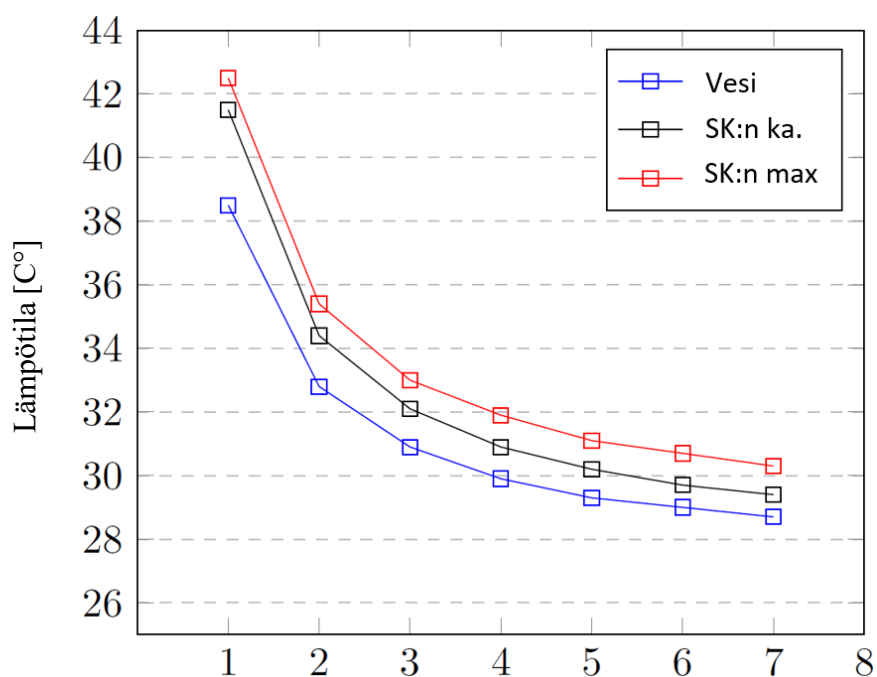
Taulukko 4. Superkiihdyttimen muodonmuutokset mikrometreinä eri jäähdytysratkaisuilla.

	Muodonmuutostyyppi			
	Kokonaismuutoksen maksimi	X-suunta	Y-suunta	Z-suunta
	µm	µm	µm	µm
JR1	41,7	+39,4 -39,4	+23,0 -7,0	+12,7 -14,0
JR2	14,5	+13,0 -13,0	+7,7 -2,2	+4,3 -4,4
JR3	15,1	+12,7 -13,9	+8,1 -2,2	+4,6 -4,7
JR4	15,0	+8,6 -13,7	+8,6 -2,0	+4,9 -5,1

Simulaation koordinaattiakseli sijoitettiin keskelle kappaletta, joten esimerkiksi X-akselin positiivinen ja negatiivinen arvo kertoo kappaleen muodonmuutoksesta akselin molempiin suuntiin. Taulukosta 4 nähdään, että JR1:ssä esiintyy muita jäähdytysratkaisuja suuremmat muodonmuutokset kaikkiin suuntiin. Loput JR:t ovat muodonmuutoksiltaan jokseenkin samanlaisia pieniä poikkeuksia lukuun ottamatta. JR1:n ja JR2:n X-akselin suuntainen, eli rakenteen pituussuuntainen poikkeama, on symmetrinen akselin molempiin suuntiin. Jäähdytysratkaisuissa 3 ja 4 kaikkien kolmen akselin poikkeamat ovat asymmetrisiä.

Kuvaajassa 2 näkyy jäähdytysveden virtausmäärien vaikutus rakenteen ja ulos tulevan veden lämpötilaan. Ulostulevan veden lämpötila on kuvattu sinisellä, superkiihdyttimen maksimilämpö punaisella ja keskiarvolämpötila mustalla viivalla. Jäähdytysveden alkulämpötila on 27 °C. Lämpötilat ovat celsiusasteina ja virtausmäärän yksikkö kilo per minuutti. Kaikkien kolmen lämpötilat reagoivat hyvin samanlaisesti virtauksen

Kuvaaja 2. Jäähdytysveden massavirran vaikutus lämpötiloihin.



nostamiseen. Virtauksen nostaminen yhdestä kolmeen kiloa minuutissa alentaa huomattavasti lämpötiloja. Virtauksen noustessa yli 4 kg/min alkaa lämpötilan lasku tasoittua kaikilla mittapisteillä, lähentyen jäähdytysveden alkuarvoa 27 °C.

4.4 Lämpösimulaation tulosten pohdinta

4.4.1 Jäähdytysratkaisujen vertailu

Lämpösimulaatioissa Y-suuntaisten deformaatioiden ääriarvot olivat rakenteen ulkosivuilla ja pienenevät säteen keskilinjaa kohti mentäessä. Vastaavasti Z-poikkeamien

ääriarvot rakenteen ylä- ja alalaidalla pienentyen keskilinjaa kohti. Rakenteen kriittisin kohta on keskiakseli, jota pitkin säde kulkee. Project Implementation Plan (Aicheler et al. 2018, s. 12) määrittelee säteen paikoituksen toleranssiksi vain 14 μm , joten lämpökuorman aiheuttamat useiden mikrometrien vääristymät rakenteessa on otettava huomioon suunnittelussa. Rakenteen ja jäähdytysveden lämpötilojen poikkeavuuksia mielenkiintoisempi oli kuumien ja kylmien alueiden sijaintien ja suuruksien erot. Tämä alueiden vaihtelevuus vaikutti merkittävästi rakenteen muodonmuutoksiin. Neljästä simulaatiossa olleesta jäähdytysratkaisusta JR2:ssa esiintyneet deformaatiot ovat kenties suotuisimmat. Tässä sommittelussa superkiihdytin laajenee pituussuunnassa symmetrisesti akselin molempiin suuntiin, kuten taulukosta 4 nähdään. Tämä symmetria voi olla tärkeä ominaisuus, sillä symmetrinen deformaatio on helpompi ottaa huomioon suunnittelu- ja rakennusvaiheessa kuin epäsymmetrinen. Myös JR1:ssä esiintyi vastaava symmetria X-suunnassa, mutta kokonaisdeformaation suuruuden vuoksi on se vähemmän lupaava muihin sommitteluihin nähden. JR3 ja JR4 eivät näyttäyty deformaatioiden kannalta erityisen positiivisessa tai negatiivisessa valossa

4.4.2 Vedenkierron lisäämisen vaikutus JR1:een

Jäähdytysratkaisu 1:lle tehdystä lisätutkimus, kuvaajassa 2, selviää virtauksen lisäämisen tuoma jäähdytystehon kasvu. Alle 4 kg/min virtauksilla rakenne lämpenee voimakkaasti, yhden ja neljän kilon virtauksien välillä on hieman yli kymmenen asteen lämpötilaero sekä rakenteen keskilämpötilassa että maksimilämpötilassa. Massavirran ylittäessä 5 kg/min ei enää saada huomattavia lämpötilojen laskua, vaan kuvaajien kulmakerroin tasoittuu. Hyödyllisin jäähdytysveden massavirta on 3-5 kg/min alueella, riippuen laitteen lopullisesta jäähdytyksen tarpeesta. Käytettävän veden alkulämpötilan pudottaminen toisi myös lisää tehokkuutta jäähdytysjärjestelmään.

4.5 Virheet

Tuloksiin sisältyy FEA (Finite Element Analysis) laskentaohjelmien luontainen virhemarginaali. Virhe muodostuu osin laskentaohjelman puutteista ja osin käyttäjästä lähtöisin olevista virheistä. Laskentaohjelman virheitä ovat numeerinen epätarkkuus, matemaattisen mallin virheet ja diskretisoinnin epätarkkuus. Käyttäjälähtöisiä virheitä

ovat ohjelman rajoitteiden huomioimisen laiminlyönti, virheellisten arvojen syöttäminen ja väärin mallintaminen esimerkiksi solmukohtien linkittämisen tai puutteellisen 3D mallin käyttämisen suhteen. (Comino 2017).

Näissä analyyseissä laskentaohjelman virheet oletetaan hyvin pieniksi ihmislähtöisiin virheisiin verrattuna. Laskennallisen virheen suuruutta pyrittiin määrittämään ottamalla yksi skenaario ja tekemällä siitä kaksi eri laskentaparametreilla varustettua versiota, yhden nopeaan laskentaan suunnitellun ja toisen tarkkaan laskentaan. Malli, materiaali ja muut lähtötiedot olivat identtisiä, mutta hienompi verkotus ja raskaampi laskenta-algoritmi moninkertaistivat toisen version laskenta-ajan. Näiden kahden eri version tulokset poikkesivat keskenään alle 0,30 %, joten nopeamman laskentamenetelmän tulokset arvioitiin riittäviksi tähän työhön. Työssä pyrittiin minimoimaan ihmislähtöiset riskit tarkastuttamalla lähtöarvot ja suoritusmenetelmä aika-ajoin muun työryhmän kanssa. Myös CAD ohjelmasta tuotu malli tarkastettiin perinpohjin Ansys ympäristössä ennen laskelmien suorittamista. Suurin virheiden mahdollisuus sijaitsee tukipisteiden valinnassa ja niiden vapausasteiden määrittelyssä. Tukipisteet pyrittiin valitsemaan tarkoin, mutta ne eivät täydellisesti kuvaa varsinaisen tuennan jäykkyyttä. Värähtelysimulaatiossa käytetyt etämassat aiheuttavat myös potentiaalisesti merkittävän virheen, sillä niiden paikka, suuruus ja kontaktipinnat ovat vain arvioita mahdollisesta laitteistosta jota niillä simuloidaan.

5 YHTEENVETO

5.1 Värähtelysimulaatio

Lineaarikiihdytinmoduulin, eli CLICn, kuusi ensimmäistä värähtelymoodien taajuutta ovat 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 30 Hz, 40 Hz ja 55 Hz, kuten kuvattu taulukossa 2. Värähtelysimulaatio näyttää, että CLIC-moduulissa on kaksi hyvin eri tavoin käyttäytyvää kappaletta. Ensimmäinen kappale koostuu runkopalkista ja sen kiinnikkeistä. Toinen kappale koostuu superkiihdytinketjusta ja sen asemointi- ja säätöjärjestelmästä. Jälkimmäinen näistä kahdesta kokonaisuudesta alkaa värähtelemään merkittävästi rajummin matalilla taajuuksilla, kun taas ensin mainittu runkopalkki - kokonaisuus pysyy jokseenkin paikoillaan, kuten nähdään kuvissa 5-7, jossa rautalankamalli kuvaa kappaleiden lepoasennon. Pienentämällä SKK:n yllä olevaa massaa voidaan merkittävästi nostaa ominaisvärähtelytaajuuksia ja vastaavasti kasvattamalla tätä massaa ominaisvärähtelytaajuus laskee, esitetty kuvaajassa 1. Erityisen ongelmalliseksi saattaa muodostua rakenteen toinen värähtelymoodi, jonka taajuus 25 Hz mahdollisesti reagoi haitallisesti Eurooppalaisen sähköverkon taajuuden, 50 Hz (Alanen & Hätönen 2006), kanssa. Jatkotutkimuksien avulla voitaisiin selvittää, voidaanko ominaisvärähtelytaajuutta nostaa keventämällä rakennetta tai laskemalla massakeskipistettä lähemmäs tukipistettä.

5.2 Lämpösimulaatio

Lämpösimulaation mukaan kaikkien jäähdytysratkaisujen, kuvattu kuvissa 8-11, lauhdevesi lämpenee suurin piirtein 30 °C tuntumaan. Jäähdytysratkaisujen vaikutukset lämpölaajenemisen aiheuttamiin muodonmuutoksiin on kerätty taulukkoon 4. Näistä jäähdytyskiertojen pohjapiirroksista JR1 tuo laajimmat muodonmuutokset superkiihdyttimeen. JR2 ja JR3 tulokset ovat lupaavimman oloisia, mitä tulee rakenteen muodonmuutoksiin. Näiden ratkaisujen tuoma symmetrinen deformaatio pituussuunnassa (X-akselin suunta) on todennäköisesti helpompi kompensoida

valmistusvaiheessa kuin muiden jäähdytysratkaisujen aiheuttama epätasainen muodonmuutos. Vaaka- ja pystysuuntien muodonmuutokset eivät ole kiihdyttimen kannalta erityisen haitallisia, sillä niiden poikkeamien ääriarvot olivat rakenteen ulkopinnalla ja lähestyvät nollaa liikuttaessa kohti kriittisintä kohtaa eli säteen kulkulinjaa.

Lämpösimulaation toisessa osassa tarkasteltiin JR1 sommittelun jäähdytysveden massavirran muutoksen vaikutuksia rakenteen maksimi- ja keskiarvolämpötilaan, sekä ulostulevan lauhdeveden lämpötilaan. Tämän osion tulokset on piirretty kuvaajaan 2. Tulosten perusteella 3-5 kg/min massavirta tuottaa parhaimmat tulokset saavutetun jäähdytystehon ja tarvittavan vesimassan suhteen. Mikäli jäähdytykseltä halutaan lisätehoja, olisi suositeltavaa tutkia käytettävän veden alkulämpötilan alentamista.

LÄHDELUETTELO

Aicheler M., 2010. Surface phenomena associated with thermal cycling of copper and their impact on the service life of particle accelerator structures. Bochum: Ruhr University, 138 s.

Aicheler M. (toim.), Burrows P. N. (toim.), Catalan N. (toim.), Corsini R. (toim.), Draper M. (toim.), Osborne J. (toim.), Schulte D. (toim.), Stapnes S. (toim.), Stuart M. J. (toim.), 2018. The Compact Linear Collider (CLIC) – Project Implementation Plan, CERN Yellow Reports: Monographs, Vol. 4/2018, CERN–2018–010–M. Geneva: CERN, 261 s. ISBN 978–92–9083–515–8.

Aicheler M. (toim.), Burrows P. N. (toim.), Draper M. (toim.), Garvey T. (toim.), Lebrun P. (toim.), Peach K. (toim.), Phinney N. (toim.), Schmickler H. (toim.), Schulte D. (toim.), Toge N. (toim.), 2012. A Multi-TeV linear collider based on CLIC technology: CLIC Conceptual Design Report, CERN-2012-007. Geneva: CERN, 813 s. ISBN 978-92-9083-379-6.

Alanen R., Hätönen H., 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta, State of art -selvitys, Espoo: VTT, 85 s. ISBN 951-38-6604-1.

Anton Paar, 2019. Viscosity of Water [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://wiki.anton-paar.com/en/water/> [viitattu 18.6.2019]

Artoos K., Collette C., Deleglise G., Esposito M., Fernandez Carmona P., Guinchard M., Janssens S., Jeremie A., Leuxe R., Modena M., Morón Ballester R., Struik M., 2011. Modal Analysis and Measurement of Water Cooling induced Vibrations on a CLIC Main Beam Quadrupole Prototype. 2nd International Particle Accelerator Conference – Beam Instrumentation and Feedback, San Sebastian, Spain 2011, s. 541-543. CERN-ATS-2011-237

Assmann R.W., Becker F., Bossart R., Burkhardt H., Braun H., Carron G., Coosemans W., Corsini R., D’Amico E.T., Delahaye J.-P., Doeber S., Fartoukh S., Ferrari A., Geschonke G., Godot J.-C., Groening L., Guignard G. (toim.), Hutchins S., Jeanneret J.-B., Jensen E., Jowett J., Kamitani T., Millich A., Napoly O., Pearce P., Perriollat F., Pittin R., Potier J.-P., Riche A., Rinolfi L., Risselada T., Royer P., Raubenheimer T., Ruggiero F., Ruth R., Schulte D., Suberlucq G., Syrathev I.,

Thorndahl L., Trautner H., Verdier A., Wilson I., Wuensch W., Zhou F., Zimmermann F., 2000. A 3 TeV e^+e^- Linear Collider Based on CLIC Technology, CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2000-008, Geneva: CERN, 76 s. ISBN 92-9083-168-5.

CERN, 2012. About CERN [verkkodokumentti]. CERN Document Server. Saatavissa: <https://cds.cern.ch/record/1997225> [viitattu 4.12.2019].

CERN, 2012. Accelerator complex. CERN Document Server. Saatavissa: <https://cds.cern.ch/record/1997193> [viitattu 17.12.2019].

CERN, 2012. Member states [verkkodokumentti]. CERN Document Server. Saatavissa: <https://cds.cern.ch/record/1997223> [viitattu 4.12.2019].

CERN, 2012. The Compact Linear Collider. CERN Document Server. Saatavissa: <https://cds.cern.ch/record/1997192> [viitattu 18.12.2019].

Comino P., 2017. SkyCiv Blog - SkyCiv Cloud Engineering Software, Sources of Error When Using Structural Analysis Software [verkkodokumentti]. Sydney: Sky Civ. Saatavissa: <https://skyciv.com/education/sources-of-error-when-using-structural-analysis-software/> [viitattu 26.2.2020]

Cooper J. R., 2008. Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Viscosity of Ordinary Water Substance, IAPWS R12-08. Berlin: The International Association for the Properties of Water and Steam, 9 s.

Dannheim D., Krüger K., Levy A., Nürnberg A., Sicking E., 2019. Detector Technologies for CLIC, CERN-2019-001. Geneva: CERN, 152 s. ISBN 978-92-9083-536-3

Ellis J., 2000. General Introduction – Prospects for physics. Teoksessa: Guignard G., (toim.) A 3 TeV e^+e^- Linear Collider Based on CLIC Technology. CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2000-008, Geneva: CERN, s. 1. ISBN 92-9083-168-5.

Engineering ToolBox, 2004. Water - Specific Heat [verkkodokumentti]. Saatavilla: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html [viitattu 18.6.2019].

Engineering ToolBox, 2018. Water - Thermal Conductivity [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/water-liquid-gas-thermal-conductivity-temperature-pressure-d_2012.html [viitattu 18.6.2019].

Engineering ToolBox, 2003. Emissivity Coefficients Materials [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html [viitattu 18.6.2019].

Gröbner O., Mathewson A. G., Marin P. C., 1993. Gas desorption from an oxygen free high conductivity copper vacuum chamber by synchrotron radiation photons, 20 s. Geneva: CERN.

Herr W., Muratori B., 2006. Concept of Luminosity. Teoksessa: Brandt D. (toim.) CERN Accelerator School: Intermediate Course on Accelerator Physics, Zeuthen, Germany, 15-26 Sep 2003. Geneva: CERN, s. 361-377. ISBN 9290832673.

Lebrun P., Linssen L., Lucaci-Timoe A., Schulte D., Simon F., Stapnes S., Toge N., Weerts J., Wells J., 2012. The CLIC Programme: towards a staged e^+e^- Linear Collider - exploring the Terascale, CLIC Conceptual Design Report, CERN-2012-005. Geneva: CERN, 84 s. ISBN 978-92-9083-377-2

Moilanen A., Aicheler M., Vamvakas A., Väinölä J. I., Doeberst S., 2017. Finite Element Model for Thermal-Structural analysis of CLIC Lab Module type 0#2, CERN-ACC-2017-0016. Geneva: CERN.

Syratchev I., 2003. Different mechanisms and scenarios for the local RF power production switching in a case of single CLIC PETS or accelerating structure failure [verkkodokumentti]. Saatavissa https://clic-meeting.web.cern.ch/2003/05_23is1.pdf [viitattu 1.6.2020]

Wilson I., 2004. The compact linear collider CLIC. Teoksessa: Ellis J. R. (toim.), Gillies J. D. (toim.), Jacob M. R. M. (toim.), Plane D. (toim.), Treille D. (toim.), CERN: the second twenty five years, Amsterdam: North-Holland, 2004, s. 365-378.